

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01725

研究課題名(和文) 界面フィラー配列ネットワークポリマーアロイ複合材の熱力学平衡論・速度論

研究課題名(英文) Thermodynamics and kinetics of networked polymer-alloy composites with aligned fillers at interfaces

研究代表者

岸 肇(Kishi, Hajime)

兵庫県立大学・工学研究科・教授

研究者番号：60347523

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：共連続相構造を有するエポキシポリマーアロイ/フィラー分散複合材に関し、相分離構造中にフィラーを自己組織的に配列させるための熱力学主導原理を探索した。共連続相構造を形成するエポキシポリマーアロイ2種(数マイクロメートルの構造周期を持つ反応誘起型相分離系と数十ナノメートルの構造周期を持つ自己組織型相分離系)について銀フィラー存在場所および導電率を調べた。いずれもハンセン溶解度パラメータ距離の近い成分に銀フィラーの選択配置が為され、界面自由エネルギー減少が構造決定の推進力になったと証明された。数十ナノメートルサイズの共連続相構造の方が導電率発現に必要な銀フィラー量の閾値が小さいことも知られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ネットワークポリマーは高強度、高弾性率といった静的力学特性や接着性に優れ、有機材料の中では耐熱性、耐溶剤性といった耐環境性にも優れており、電子材料、繊維強化複合材、接着剤、塗料等の種々の用途に使用され社会を支えている。ネットワークポリマー強靱化技術の1つとして、異種ポリマーとの複合化により微細相構造を形成させるポリマーアロイが検討されてきた。本研究は、このネットワークポリマーアロイを強靱化目的のみならず、複合材中の機能性フィラー配列のテンプレートとする着想のもと、微細相形成の熱力学と機能発現の関係を研究した。熱力学平衡論と速度論の両面から微細相構造決定因子の解明を目指したものである。

研究成果の概要(英文)：Thermodynamically driven principles for the self-organization of fillers in phase-separated structures in epoxy polymer alloy/filler dispersion composites with a co-continuous phase structure have been explored. The location of silver fillers and electrical conductivity were investigated for two epoxy polymer alloys forming co-continuous structures (a reaction-induced phase-separated system with a structural period of a few micrometers and a self-assembled phase-separated system with a structural period of several tens of nanometers). In both systems, silver fillers were selectively placed in the component with the closest Hansen solubility parameter distance, proving that the decrease in interfacial free energy was the driving force determining the microstructure. The threshold of the amount of silver fillers required for achieving the conductivity was smaller for co-continuous structures of several tens of nanometers in size than for those of a few micrometers.

研究分野：高分子材料工学、複合材料工学、接着工学

キーワード：エポキシ ポリマーブレンド フィラー 複合材 導電

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ネットワークポリマー(架橋高分子)は高強度、高弾性率といった静的力学特性や接着性に優れ、有機材料の中では耐熱性、耐溶剤性といった耐環境性にも優れており、電子材料、繊維強化複合材、接着剤、塗料等の種々の用途に使用され社会を支えている。但し、ネットワーク(架橋)構造ゆえの分子運動拘束の結果、比較的脆く耐衝撃性に乏しい材料になりやすい。そこで、ネットワークポリマー強靱化技術の1つとして、反応性エラストマーや熱可塑性樹脂を未硬化段階の樹脂(モノマー、オリゴマー)に溶解させ、ネットワーク形成過程で相構造を生じさせる、いわゆる反応誘起型相分離を用いたポリマーアロイが検討されてきた。主成分である未硬化樹脂とマイナー成分であるポリマーの種類や組成比に応じて、マイナー成分であるポリマーからなる相が分散相を形成する相分離形態のみならず、組成比によっては連続相を形成する場合もある。相構造形態に応じて弾性率をはじめとする力学特性が変化し、成分の組み合わせ次第では顕著な強靱化効果が得られる。

我々は、このネットワークポリマーアロイ技術を強靱化目的のためだけでなく機能性フィラー添加複合材のテンプレートとして用いる着眼点で研究を行ってきた。まず初めに、エポキシ樹脂/ポリエーテルスルホン(PES)ブレンドが形成する相構造をテンプレートとしてフィラーの選択配置現象を見いだした。エポキシ/硬化剤の重合反応(高分子化)がもたらす混合自由エネルギーの増加を推進力として、硬化過程で相分離が生じサブミクロン~ミクロンサイズの相構造が形成される。ブレンド組成に予め銀フィラーを共存させておくと、重合反応によって誘起される相分離過程で脂肪酸被覆銀フィラーはエポキシ連続相のみに選択配置された。その結果、PES無添加の純粋なエポキシマトリックスの場合と比べて半分量の銀フィラーにて複合材の導電性が同程度まで発現した(Self-assembled three dimensional structure of epoxy / polyethersulphone / silver adhesives with electrical conductivity, H.Kishi et al., *Polymer*, 82, 1, 93-99 (2016))。PESリッチ相に比べてエポキシリッチ相の方が脂肪酸被覆銀フィラー表面との親和性が勝るゆえ、ブレンド系の界面自由エネルギーを低下させるべくエポキシ相中に選択配置し、結果、銀フィラーの連続チャンネルが自己組織的に形成されたと考えた(H24-26年度科研費基盤研究B課題番号:24360280)。但し、このフィラー選択配置メカニズムは本研究開始時点では仮説であり、この仮説の検証が課題であった。その後の詳細な顕微鏡観察やシミュレーションにより、狭い体積のテンプレート相内で互いに接触したまま加熱された銀フィラー間に焼結が生じ、フィラー界面抵抗低減やフィラーアスペクト比の擬似的増加を齎すことが、上記マイクロメートルサイズの共連続構造を形成するエポキシ/熱可塑性ポリマーブレンド/銀フィラー複合材の導電性・熱伝導率発現のキーパラメータとなることもわかった(Synergistic effect of phase structures and in situ sintering of silver fillers on thermal conductivity of epoxy/polyethersulphone/silver filler composites, H.Kishi et al., *Polymer*, 223, 123726 (2021))。

他方、過去にH21-23科研費基盤B(課題番号:21360331)において、リビングアニオン重合にて分子量分布を制御したPMMA-PnBA-PMMAトリブロック共重合体(BCP)を用い、ビスフェノールA型エポキシ樹脂/硬化剤ブレンド樹脂中に形成される相構造について研究した。BCP中のハードブロック鎖(PMMA鎖)を相溶しうるエポキシ硬化系を組み合わせる際に、ソフトブロック鎖(PnBA鎖)集合体からなる約20~40nmの規則的なナノ相構造が硬化樹脂中に形成されることを見出した。また、球、配列シリンダー、ランダムシリンダー、湾曲ラメラ等のナノ相構造形態を、BCPのブロック組成、分子量、およびエポキシ樹脂中濃度を可変因子として作り分け、強靱性発現や弾性率制御を齎す機構を明らかにした(H.Kishi et al., *Polymer*, 52, 3, 760-768 (2011); *eXPRESS Polymer Letters*, Vol.9(No.1), 23-35 (2015); *eXPRESS Polymer Letters*, 11, 10, 765-777 (2017); *Polymer*, 176, 89-100, (2019))。さらに、こうした自己組織化ナノ相構造を有するネットワークポリマーブレンドをフィラー複合材のテンプレートとして用い、フィラー高次構造形成や機能発現に活用する研究を科研費H27-29科研費基盤B(課題番号:15H04135)にて行った。具体的には、エポキシ/BCPポリマーブレンド中の自己組織化ナノ共連続構造をテンプレートとした銀ナノフィラー配列を目指した。未硬化状態のエポキシ/BCPポリマーブレンドに分散性良好な炭酸銀(Ag_2CO_3)をナノ銀 in-situ 形成のための前駆体として加え、炭酸銀の in-situ 還元反応により生成した銀ナノフィラーがブレンド硬化マトリックス中においてPnBA相(BCP中のソフトブロック鎖の集合体)に沿って部分的に配列することを見出した。但し、この時点において銀ナノフィラーの選択配置メカニズムは詳細不明であり、熱力学的説明が課題であった。

2. 研究の目的

本研究は、共連続相構造を有するネットワークポリマーアロイ中にフィラーが分散された複合材において、フィラーを異種ポリマー成分からなる相分離構造中(望ましくは相分離界面)に自己組織的に配列させるための熱力学的主導原理(熱力学平衡論・速度論等)の構築を目的とした。ネットワークポリマーアロイ共連続相構造をテンプレートとしてフィラーを自己組織的に連続配列させ得れば、極少量のフィラーにてチャンネル形成が可能となり機能性複合材の創出を導くと期待できる。

3. 研究の方法

本研究において実験系としたネットワークポリマーアロイ・フィラー複合材は次の2種に大別される。両系について熱力学的共通因子となる成分間相互作用とフィラー選択配置場所の関係を検証した。

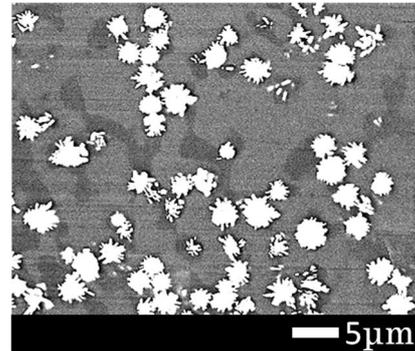
- (1) 反応誘起型相分離機構にてマイクロメートルサイズの共連続構造を形成するエポキシ/熱可塑性ポリマーアロイをマトリックスとした銀フィラー複合材
- (2) 自己組織型相分離機構にて数十ナノメートルサイズの共連続構造を形成するエポキシ/BCPポリマーアロイをマトリックスとした in-situ 生成銀ナノフィラー複合材

4. 研究成果

- (1) 反応誘起型相分離機構にてマイクロメートルサイズの共連続構造を形成するエポキシ/熱可塑性ポリマーアロイをマトリックスとした銀フィラー複合材

実験系として、エポキシ/in-situ 重合メタクリルポリマーブレンドをマトリックスとし、マイクロメートルサイズの銀フィラーを分散させた複合材を調製した。具体的には、ビスフェノールF型ジグリシジルエーテル(DGEBF)をエポキシオリゴマーとして用い、ここにジシクロペンテニルオキシエチルメタクリレート(DPOMA)モノマーをブレンドした。メタクリレートモノマーはアゾ系開始剤を用いた in-situ ラジカル重合によりエポキシオリゴマー中でポリマー化した。その後、イミダゾール触媒存在下でのアニオン重合によりエポキシオリゴマーをネットワークポリマーとした。この2種の重合はお互いに干渉し合わない。重合過程でブレンド組成物は反応誘起型相分離を生じ、マイクロメートルサイズの共連続相構造を形成した。重合前のオリゴマー/モノマー組成物にミリスチン酸処理銀フィラーを予め分散し導電性エポキシ複合材を得ることに成功した。走査型電子顕微鏡観察により、重合ブレンド物中には共連続相構造が形成され、メタクリルポリマーリッチ相に銀フィラーが選択配置したことが明らかとなった(図1)。体積割合の小さい連続相中への銀フィラー選択配置により、フィラー接触(連続性)が増し低銀フィラー含有率での導電チャンネル形成がなされた。

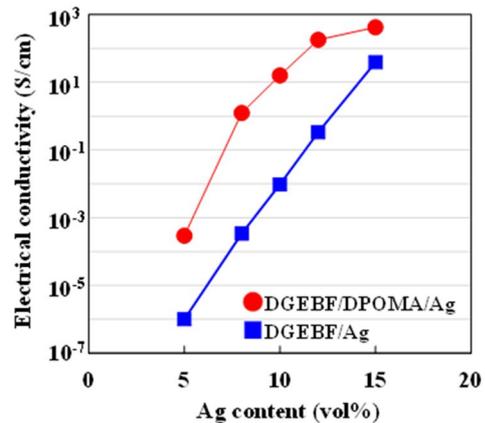
図1: DGEBF/40 wt% DPOMA/10 vol% Ag 複合材断面のSEM 反射電子像。(白色粒子が銀フィラーであり、メタクリルポリマーリッチ相(暗相)に選択配置した様子)



結果、比較材(DGEBF/銀フィラー複合材)と同等の導電率 10^1 S/cm 発現に要する銀量(体積含有率)を約2/3に低減できた(図2)。また、同じ銀添加量にて両者を比較すると、メタクリルブレンド相分離系の方が高導電率を発現したことがわかった。

図2: 銀フィラー含有エポキシポリマー複合材のフィラー体積含有率と導電率の関係:

- : DGEBF/40 wt% DPOMA/Ag composites,
- : DGEBF/Ag composites



銀フィラーの選択配置メカニズムについて、ハンセン溶解度パラメータ(HSP)を測定し成分間相互の親和性を比較検討した。まず、エポキシ/メタクリルポリマーブレンドマトリックスの動的粘弾性を測定し、2相にそれぞれ帰属される T_g を求め、Fox式を用いることにより、各相を構成する組成の推定を試みた。結果、エポキシポリマーリッチ相は約77wt%のDGEBFポリマー成分に約24wt%のDPOMAポリマー成分が混合された組成からなり、一方メタクリルポリマーリッチ相はDPOMAポリマー成分が約97wt%、DGEBFポリマー成分が約3wt%の組成と推定された。こうした組成分配が生じることが反応誘起型相分離の特徴である。これらの組成分配値および各成分単体のHSP、密度を用い、エポキシリッチ相、メタクリルポリマーリッチ相それぞれのHSP3成分を求めた。図3の3軸座標上に示される銀フィラーとのHSP距離 R_a はメタクリルポリマーリッチ相の方がエポキシリッチ相より短く、銀フィラーとの親和性が高い関係にあり、選択配置理由が裏付けられた。

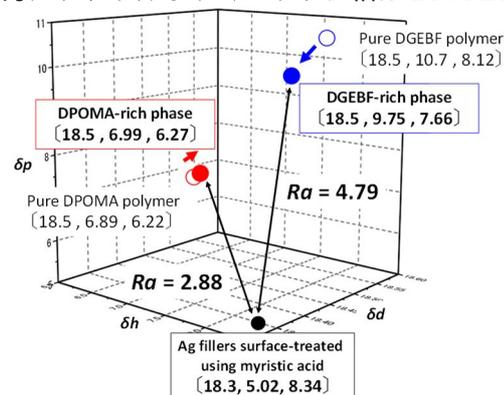


図3: DGEBF/40 wt% DPOMA/Ag 複合材における構成要素のHSPおよび構成要素間のHSP距離 R_a 。

(2)自己組織型相分離機構にて数十ナノメートルサイズの共連続構造を形成するエポキシ/BCP
 ポリマーアロイをマトリックスとした in-situ 生成銀ナノフィラー複合材

エポキシ樹脂の強靱化を目的とした先導研究にて見出したエポキシ/PMMA-PnBA-PMMA BCP ブレンドのナノ共連続相構造をテンプレートとして銀ナノフィラーを選択配置させた複合材を調製できれば、より少量の銀フィラーでの導電チャンネル形成が可能と考えた。また、銀フィラーもナノサイズであれば、マイクロメートルサイズの銀フィラーに比較して同添加量におけるフィラー間距離が縮まり、フィラー同士の接触確率向上効果が期待できる。また、銀ナノフィラーは表面エネルギーが高く表面融点が低く融着させやすいという点でも導電性向上に有利に働くと考えられる。具体的には、還元剤かつ表面処理剤となる脂肪族アミンにより炭酸銀を還元し形成した銀ナノフィラーとエポキシ(DGEBF)/アクリル BCP ブレンドを複合化し、液状芳香族ジアミン(MBOEA)で硬化させ、内部構造や導電性を評価した。図 4 に走査型電子顕微鏡観察像(反射電子像)を示す。低倍率観察(左図)により白色の銀ナノフィラーが複合材内部にマクロには均一分散したように見えるが、高倍率観察(右図)によりミクロには PnBA 連続相中に選択配置したことがわかった。この複合材ではオクチルアミンを還元剤兼表面処理剤として用いた。

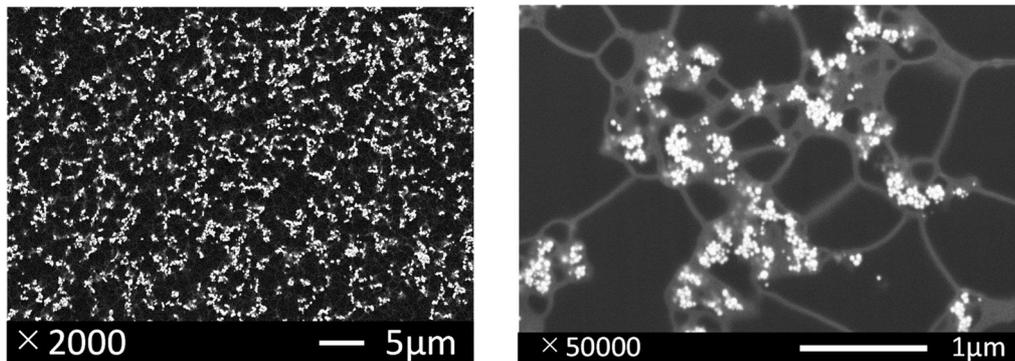


図 4: DGEBF/10wt% PMMA-PnBA-PMMA BCP/MBOEA/in-situ Ag 複合材断面の SEM 反射電子像

複合材中に還元反応により in-situ 生成した銀ナノフィラー量を横軸とし、導電率との関係を図 5 に示した。先導研究での反応誘起型マイクロメートルサイズ相分離系(エポキシ/PES/Ag)複合材と比較すると、導電率発現の閾値が低銀含有率側に移動したことが明らかであり、ナノメートルサイズテンプレートへの選択配置効果が証明されている。但し、BCP 未含有(非相分離)での in-situ 銀ナノフィラー複合材でも閾値の低銀側への移動は見られ、銀粒子自体のナノ化効果とナノ相分離テンプレートの相乗効果と言える。

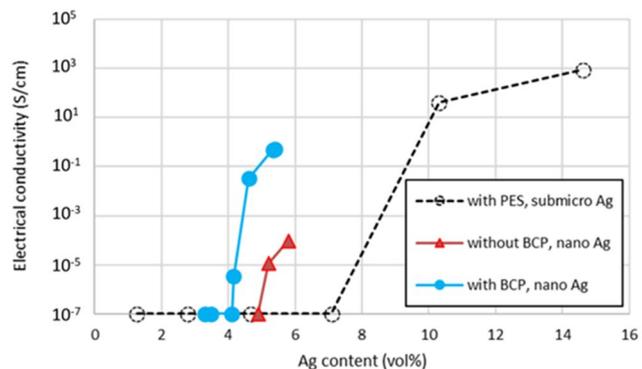


図 5: 銀ナノフィラー含有エポキシポリマー複合材のフィラー体積含有率と導電率の関係

次いで、銀ナノフィラーを被覆する脂肪族アミンを炭素鎖長の短いブチルアミンとしナノフィラー表面被覆量を変化させ、銀フィラー選択配置場所との関係を検証した(図 6)。

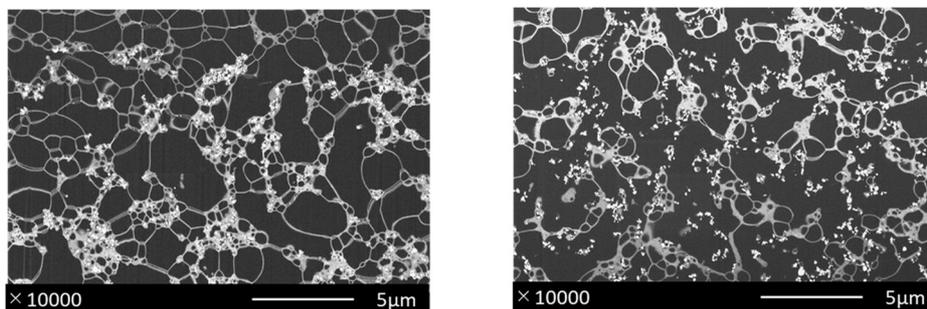


図 6: DGEBF/10wt% PMMA-PnBA-PMMA BCP/MBOEA/ブチルアミン被覆 in-situ Ag 複合材断面の SEM 反射電子像

左: ブチルアミン被覆量 2.1×10^{-4} mol/g, 右: ブチルアミン被覆量 4.2×10^{-4} mol/g

図6左の被覆量 2.1×10^{-4} mol/g では銀ナノフィラーはPnBA相に選択配置しているが、図6右の被覆量 4.2×10^{-4} mol/g では銀ナノフィラーはエポキシ相に選択配置しており、ブチルアミン被覆量によって銀ナノフィラーの選択配置場所が変化することが知られた。

各ブチルアミン被覆 Ag, PnBA およびエポキシ相(DGEBF/MBOEA 反応物)のHSP3成分を3次元図上に示し、HSP 距離を求めた(図7)。各 Ag のブチルアミン被覆量は表1に示す。まず、Ag/butylamine と Ag/butylamine の比較ではブチルアミン被覆量が増えると極性項 δp と水素結合項 δh の値が大きくなる。しかし、Ag/butylamine と Ag/butylamine の比較ではブチルアミン被覆量が増えると δp , δh の値は逆に小さくなっている。さらに Ag/butylamine と Ag/butylamine の比較ではブチルアミン被覆量が増えると、再び δp と δh の値は大きくなる。このようにブチルアミン被覆量増加に伴い δp , δh の値が増減を繰り返すことがわかった。この理由として、Ag フィラー表面に積層被覆したブチルアミン分子の向きが影響していると考えられる。

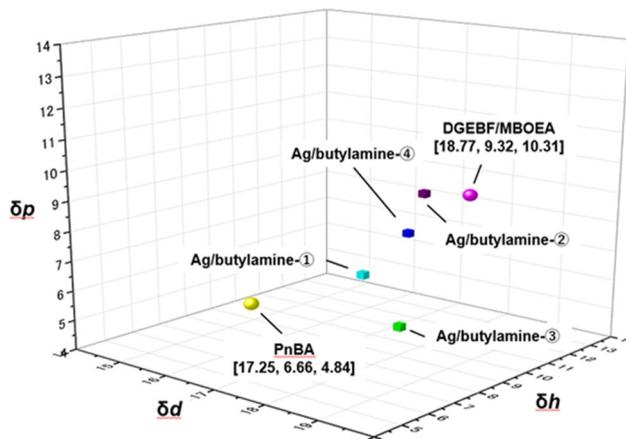


図7: DGEBF/MBOEA 反応物, PnBA, およびブチルアミン被覆 Ag nanofiller の HSP 3次元図

表1: 各ブチルアミン被覆 Ag nanofiller と PnBA 及び DGEBF/MBOEA 反応物との HSP 距離

	amount of butylamine on Ag (mol/g)	δd (MPa) ^{1/2}	δp (MPa) ^{1/2}	δh (MPa) ^{1/2}	R_a (to PnBA)	R_a (to DGEBF/MBOEA)
Ag/butylamine-	2.1×10^{-4}	17.93	7.02	7.82	3.3	3.8
Ag/butylamine-	2.4×10^{-4}	18.14	9.27	9.83	5.9	1.3
Ag/butylamine-	3.4×10^{-4}	18.88	5.94	7.18	4.1	4.6
Ag/butylamine-	4.2×10^{-4}	17.35	7.51	10.67	5.9	3.4

すなわち、第1層のアルキルアミンはアミノ基(-NH₂)を介し Ag 表面に配位結合すると考えられる。次いで、第2層アルキルアミンの Ag フィラー被覆時はアミノ基を Ag 側に向け配位した第1層アルキルアミンのアルキル鎖の上に積層していく。この時、第2層アルキルアミンは向きを反転させアルキル鎖を内側、アミノ基を外側に向け積層すると思われる。第3層アルキルアミン被覆では再度反転が起こり、以降これを繰り返すが、より外側層になるにつれ規則性の乱れた状態になると思われる。アミン硬化エポキシリッチ相はヒドロキシ基を多く含み相対的に親水性、PnBA 相は相対的に疎水性である。したがって、Ag フィラー上のアルキルアミン層表面にてアルキル鎖が外側を向いた場合は最表面が疎水性であり PnBA 相に選択配置される。逆にアミノ基が外側を向く割合が増えると最表面は相対的に親水性かつエポキシとの共有結合性を有することとなる。そのためエポキシリッチ相に選択配置されたと考えられる。より少量の Ag フィラーで導電性を発現させるためには、複合材マトリックス中で体積的に狭い PnBA 相をテンプレートとしてナノ Ag フィラーが集中的に選択配置されるようにアルキルアミン表面被覆量を制御する方が目的に叶うと考えられ、フィラー表面処理による選択配置場所制御が可能といえる。

(1)項の反応誘起型相分離系はフィラー存在下において初期の低分子状態で均一相溶していたブレンド系が高分子化する過程で相分離を起こすものであった。それに対し、(2)項の自己組織型相分離系はエポキシ/PMMA-PnBA-PMMA BCP ブレンドがエポキシの硬化反応開始前からナノサイズの相構造周期を有しつつフィラーと共存する系であり、エポキシ硬化反応(高分子化)によりナノ構造周期が拡大することが、SPring-8でのUSAXS解析にて判明している。すなわち、(1)項記載の反応誘起型相分離系と(2)項記載の自己組織型相分離系は最終的な相構造サイズが2桁異なるのみならず相分離メカニズムがまったく異なるのだが、複合材におけるフィラー選択配置場所支配因子については、大局的には界面自由エネルギーを低下させるべく混合系が構造を選択する共通の熱力学的考え方で整理できることが証明された。但し、架橋(ゲル化)によって構造凍結されるネットワークポリマーであるゆえに、熱力学的平衡状態に至る前に構造凍結されるという宿命がある。故に、ゲル化以前のどの段階でフィラー配置構造が定まるのかという速度論的要因が重要であり、混合系の分子運動性にも依存すると予想される。こうした平衡論と速度論の競争関係に関し、さらに研究が必要である。また、本研究で用いた銀フィラーは脂肪酸もしくは脂肪酸アミンで被覆されておりアルキル鎖を外側に向けた分子性の強いフィラーであったが、無機フィラーのように表面酸性・塩基性が強い系への理論拡張を目指し引き続き研究する必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hajime KISHI, Natsumi KIMURA, Ryoko HARA, Kazuyoshi YAMADA, Takeshi KAKIBE, Satoshi MATSUDA, Akira FUJITA, Hirohiko FURUI	4. 巻 241
2. 論文標題 Structure formation and conductive properties of epoxy/in situ polymerized methacrylate polymer/silver filler composites	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Polymer	6. 最初と最後の頁 124520-124520
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.polymer.2022.124520	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 古野すず, 川上聡太, 有村健, 坂口和記, 山田和義, 柿部剛史, 松田聡, 岸肇	4. 巻 10
2. 論文標題 in-situ Agフィラー/エポキシ/ブロックコポリマー導電性接着剤のナノ構造	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本接着学会誌	6. 最初と最後の頁
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 木村 夏海, 山田 和義, 古井 裕彦, 藤田 晶, 岸 肇	4. 巻 41
2. 論文標題 エポキシ/in-situ重合メタクリル樹脂ブレンドの相構造を活用した低粘度導電性接着剤	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ネットワークポリマー	6. 最初と最後の頁 193-200
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hajime KISHI, Kazuyoshi YAMADA, Jin KIMURA	4. 巻 176
2. 論文標題 Control of nanostructures and fracture toughness of epoxy/acrylic block copolymer blends using in situ manipulation of the epoxy matrix reaction type	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Polymer	6. 最初と最後の頁 89-100
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.polymer.2019.05.024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nobuyuki ODAGIRI, Hajime KISHI, Dongyeon LEE and Tomonaga OKABE	4. 巻 37
2. 論文標題 A Study of Resin Fracture Toughness Robustness: Comparison of Particle-toughened Thermosetting Resin and Micro Phase-separated Thermosetting Resin	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials System	6. 最初と最後の頁 29-35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hajime KISHI, Kentaro IMAI, Kenji IIMURA, Hidekazu TANAKA, Atsushi NAGAO, Takeshi KAKIBE and Satoshi MATSUDA	4. 巻 30
2. 論文標題 Interfacial control and mechanical properties of carbon black-reinforced carboxyl-terminated butadiene acrylonitrile rubber/ epoxy polymer composites	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Polymers for Advanced Technologies	6. 最初と最後の頁 329-335
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pat.4469	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Peter Tamas-Benyey, Eniko Bitay, Hajime Kishi, Satoshi Matsuda, Tibor Czigany	4. 巻 11
2. 論文標題 Toughening of Epoxy Resin: Effect of Water Jet Milled Worn Tire Rubber Particles	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Polymers	6. 最初と最後の頁 529-539
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/polym11030529	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 岸 肇
2. 発表標題 ネットワークポリマーブレンド・コンポジットの相構造活用による機能発現
3. 学会等名 日本接着学会 構造接着・精密接着研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岸 肇, 木村夏海, 原 瞭子, 山田 和義, 藤田 晶, 古井裕彦
2. 発表標題 エポキシ/in-situ重合メタクリルポリマー/ 銀フィラー複合材の相構造形成
3. 学会等名 高分子学会 第70回高分子討論会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岸 肇
2. 発表標題 ネットワークポリマーブレンドの 相構造を活用した導電・熱伝導複合材
3. 学会等名 高分子学会 第30回ポリマー材料フォーラム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古野すず、川上聡太、岸 肇
2. 発表標題 エポキシ/BCP/in-situナノAgコンポジットのフィラー選択配置
3. 学会等名 日本接着学会第59回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村夏海、山田和義、古井裕彦、藤田昌、岸 肇
2. 発表標題 エポキシ/in situ重合アクリルポリマーブレンド接着剤の相構造と導電性
3. 学会等名 日本接着学会第58回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古野すず、川上聡太、岸 肇
2. 発表標題 エポキシ/BCP/in-situナノAg複合材中のAg粒子の選択配置と機能発現
3. 学会等名 日本接着学会第16回関西支部若手の会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岸 肇
2. 発表標題 ネットワークポリマーブレンド・コンポジットの相構造活用による機能発現
3. 学会等名 日本接着学会 構造接着・精密接着研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hajime Kishi, Koji Kishi, Yudai Nagato, Satoshi Matsuda
2. 発表標題 Structural adhesives with sacrifice particles to lead cohesive failure
3. 学会等名 The 14th International Triennial Conference on the Science and Technology of Adhesion and Adhesives (Adhesion19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Matsuda, Ryuta Nishiwaki, Hajime Kishi
2. 発表標題 Adhesion strength of epoxy resin under hot-wet environment
3. 学会等名 The 14th International Triennial Conference on the Science and Technology of Adhesion and Adhesives (Adhesion19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岸 肇
2. 発表標題 強靱化エポキシ樹脂の架橋密度と耐疲労性
3. 学会等名 高分子学会 超分子研究会・精密ネットワークポリマー研究会第3回合同講座（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hajime Kishi, Kazuyoshi Yamada
2. 発表標題 In-situ control of interface and phase structures of nanostructured epoxy/acrylic block copolymer blends
3. 学会等名 The 256th ACS National Meeting（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hajime Kishi, Aasami Fujikawa, Souta Kawakami
2. 発表標題 Formation of continuous structure of functional fillers using phase structures in epoxy polymer blends as the templates
3. 学会等名 The 256th ACS National Meeting（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岸 肇
2. 発表標題 ポリマーブレンドを活用したエポキシ樹脂系複合材料の構造形成と機能発現
3. 学会等名 エポキシ樹脂技術協会 第42回公開技術講座（招待講演）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 岸 肇	4. 発行年 2019年
2. 出版社 株式会社シーエムシー出版	5. 総ページ数 270
3. 書名 『エポキシ樹脂の硬化メカニズム解析と機能設計』第4編 第18章 ポリマーブレンドによるエポキシ樹脂の強靱化	

1. 著者名 岸 肇	4. 発行年 2018年
2. 出版社 化学同人	5. 総ページ数 210
3. 書名 CSJカレントレビュー第29号『構造制御による革新的ソフトマテリアル創成 - ブロック共重合体の精密階層制御・解析・機能化 -』第16章 エポキシ/ブロック共重合体ポリマーブレンドの自己組織化ナノ相構造と強靱化	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	松田 聡 (MATSUDA Satoshi) (40316047)	兵庫県立大学・工学研究科・准教授 (24506)	
連携研究者	柿部 剛史 (KAKIBE Takeshi) (00633728)	兵庫県立大学・工学研究科・助教 (24506)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------